

УДК 621.311

О.С. Яндульський, В.В. Мацейко

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ НА ОСНОВІ СИНХРОНІЗОВАНИХ ВЕКТОРНИХ ВИМІРІВ

The actual questions of the study of low-frequency oscillations of power in the interconnected power system (IPS) of Ukraine in terms of introduction of modern Wide Area Measuring System (WAMS) are considered. The algorithm for identifying modes of oscillations by means of using recordings from the Phasor Measurement Units of a WAMS using spectral analysis and calculation of the main characteristics of identified fluctuations is developed. Reliability and adequacy of the algorithm is tested by comparing the results of calculations with traditional calculations of modal analysis of power system in DigSilent Power Factory. Several WAMS recordings in case of significant disturbances in the mainline power grids IPS of Ukraine were analyzed using an offered algorithm and results of analysis of frequency oscillations basic properties are presented. The level of danger of identified fluctuations in terms of under-damping of identified oscillations and a possible violation of the vibrational stability of the power system for the case of a cascade failure of Uglegorskaya TPP is clearly reflected in the article.

Keywords: low frequency oscillations, Wide Area Measuring System, spectral analysis, modal analysis, damping.

Вступ

Досвід експлуатації сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС) світу свідчить, що зниження надійності функціонування ЕЕС та обмеження можливості нормальної роботи виникає внаслідок появи системних коливань, що спостерігаються при наявності слабких міжсистемних зв'язків. Світова практика налічує численні аварії, причиною яких стали низькочастотні коливання (НЧК) режимних параметрів [1]. У зв'язку з цим дослідження коливальних властивостей ЕЕС, зменшення впливу НЧК на режими роботи та підвищення стійкості ЕЕС є одними з головних завдань систем диспетчерського управління.

Впровадження систем моніторингу перехідних режимів (СМПР) і поява нових інформаційних технологій вивели дослідження та аналіз НЧК в ЕЕС на якісно новий рівень. Ці технології синхронізованих векторних вимірів параметрів електромеханічних перехідних режимів створили нові можливості виявлення НЧК як в режимі офлайн, так і в онлайн. Перспективою ідентифікації НЧК та їх параметрів є подальше використання цієї інформації для формування управляючих дій по демпфуванню небезпечних коливань, сигналізації про небезпеку режиму та визначення необхідних дій зі зниження рівня цієї небезпеки.

Одним зі світових лідерів у дослідженні зазначених завдань є шотландська фірма Psumetrix у складі компанії AlstomGrid, чий комплексні рішення з моніторингу і управління динамічним станом в ЕЕС з використанням технологій синхронізованих векторних вимірів у режимі реального часу успішно впроваджуються в різних ЕЕС

світу з 1995 р. [2]. Досвід впровадження моніторингу енергосистеми в режимі реального часу вже показав свої переваги: зниження ризику розвитку серйозних аварій, запобігання розділенню частин ЕС; контроль системних обмежень у режимі реального часу; глибока ситуаційна поінформованість дає можливість досягти максимального використання пропускної здатності ліній електропередач (ЛЕП) без підвищення ризику розвитку аварійних ситуацій; підвищення точності планування операцій на ринку з врахуванням прогнозів меж і реальної пропускної здатності мереж; ефективне використання можливостей розподіленої генерації зі змінним графіком вироблення електроенергії; верифікація динамічних моделей, що покращує точність та ефективність моделювання режимів роботи ЕЕС; виявлення коливальних процесів в ЕЕС, оцінка ефективності демпфування; моніторинг термічного навантаження обладнання. Постійний моніторинг коливальних процесів в ЕЕС та термічного навантаження обладнання використовується для контролю передачі потужності в перетинах при відмові від режимних обмежень, визначених по принципу "до" в режимі офлайн, що забезпечує в нормальних умовах збільшення пропускної здатності перетинів ЕЕС.

Об'єднана електроенергетична система (ОЕС) України характеризується наявністю потужних ЕЕС з відносно слабкими міжсистемними зв'язками [3]. Недостатня пропускна здатність ЛЕП для видачі потужності з атомних електростанцій (АЕС), передача надлишкової потужності Західного регіону в центр та на схід країни по зазначених слабких зв'язках, а також інші взаємопов'язані чинники, створюють ха-

рактарні умови та середовище для появи небезпечних НЧК з точки зору забезпечення стійкості ОЕС. До того ж перспектива збільшення передачі потужності по головних перетинах ОЕС при відмові від будівництва нових ЛЕП є надзвичайно привабливою в умовах нищівного економічного стану країни.

Станом на кінець 2013 р. на об'єктах ОЕС України (дві електростанції та 22 підстанції) розміщено 24 пристрої СМПР вітчизняного виробництва типу Регіна-Ч, які забезпечують моніторинг 75 повітряних ліній (ПЛ) класами напруг 220–750 кВ [4]. Також у межах виконання науково-технічних робіт Національним технічним університетом України “Київський політехнічний інститут” спільно з вітчизняними фахівцями Інституту електродинаміки НАН України ініційовано встановлення пристроїв Регіна-Ч на двох електростанціях ОЕС України (Запорізька ТЕС, Зуївська ТЕС) на визначений період протягом 2013 р. з метою забезпечення безперервного моніторингу роботи блоків/агрегатів, які мають можливість участі в первинному регулюванні частоти й активної потужності.

Постановка задачі

Мета роботи полягає в розробленні алгоритму ідентифікації НЧК на основі синхронізованих вимірів режимних параметрів і розрахунку основних характеристик виявлених коливань для оцінювання поточних режимів роботи ЕЕС з точки зору недостатнього демпфування виявлених коливань та можливого порушення коливальної стійкості ЕЕС; верифікації розробленого алгоритму; дослідження та аналізу НЧК перетоків активної потужності по внутрішніх та міждержавних ЛЕП при виникненні значних збурень у системоутворювальній мережі ОЕС України.

Розроблення алгоритму ідентифікації НЧК на основі даних СМПР та розрахунків їх основних характеристик

В основу представленого методу ідентифікації НЧК потужності покладено спектральний аналіз, а саме швидке перетворення Фур'є (ШПФ), яке являє собою добре опрацьовану та закінчену теорію [5]. Побудова амплітудно-частотних спектрів перетоків активної потужності при використанні синхронізованих вимірів методом ШПФ забезпечує ідентифікацію домінуючих частот коливань, які присутні та переважають у розглянутих сигналах.

Повторне застосування спектрального аналізу до досліджуваних сигналів перетоків активної потужності на часових інтервалах, що відповідають періодам ідентифікованих домінуючих частот, дає можливість визначення амплітуд двох послідовних періодів коливань. Подальший алгоритм дослідження НЧК (рис. 1) домінуючої частоти базується на використанні визначених величин та включає розрахунок основних характеристик коливального процесу (декремент затухання, логарифмічний декремент затухання, коефіцієнт затухання, час затухання, коефіцієнт демпфування).

Додаткове визначення властивостей коливального процесу здійснюється через відтворення власного числа, що відповідає ідентифікованій моді коливання, розрахунку його величини та кута. Зображення власних чисел на комплексній площині в координатах дійсної та уявної частини дає змогу наочно й швидко оцінити небезпеку поточних режимів роботи ЕЕС з точки зору недостатнього демпфування виявлених коливань та можливого порушення коливальної стійкості ЕЕС.

Достовірність та адекватність запропонованого алгоритму дослідження НЧК перевірено зіставленням результатів розрахунків з традиційним розрахунком коливальних властивостей ЕЕС методом модального аналізу в програмному середовищі Power Factory для тривузлової схеми, яка складається з двох генераторів та шин нескінченної потужності (ШНП), наведеної на рис. 2.

Зазначимо, що модальний аналіз в Power Factory являє собою аналіз лінеаризованої системи диференціальних рівнянь з використанням QR-алгоритму (безпосередньо використовувався при проведенні описаних досліджень) або методів вибіркового аналізу. Отримані власні числа матриці ЕЕС $\lambda_j = \delta_j \pm j\omega_j$ дають можливість визначити найбільш небезпечні моди коливань системи, які загалом відповідають можливим режимам коливань. Дійсна і уявна складові частини власного значення λ_j матриці стану характеризують, відповідно, коефіцієнт затухання δ_j та власну частоту ω_j j -ї моди руху енергосистеми, а комплексні компоненти власних векторів впливають на величини амплітуд і початкових фаз j -ї складової частини руху в змінній стану [6].



Рис. 1. Алгоритм ідентифікації НЧК

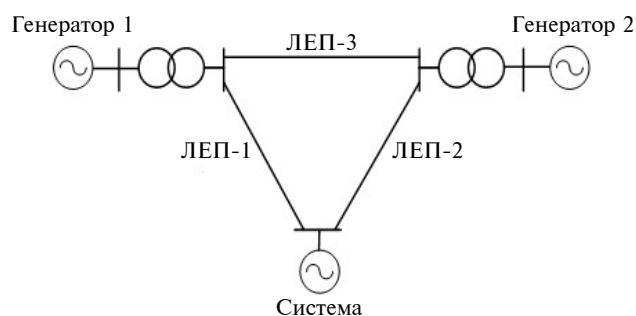


Рис. 2. Тестова тривузлова схема

Як збурення було вибрано виникнення трифазного короткого замикання (3-ф. к.з.) на ЛЕП-1 в момент часу 1 с тривалістю 0,2 с. Процеси зміни перетоків активної потужності по ЛЕП схеми при виникненні описаного збурення наведено на рис. 3.

Результати застосування модального аналізу для розглянутої схеми подано в табл. 1 (виділено по одному комплексному числу з отриманих комплексно-спряжених чисел, що розміщуються у верхній частині комплексної площини).

Програмне забезпечення Power Factory в рамках виконання модального аналізу дає змогу для кожної моди коливань визначити генератори, які найбільше впливають на коливання. Так, мода коливання з частотою 1,74 Гц ініціюється протифазними коливаннями генераторів між собою, а 1,56 Гц – синфазні коливання генераторів відносно ШНП.

Для реалізації запропонованого алгоритму значення перетоків активної потужності по ЛЕП були експортовані з Power Factory з періодом дискретизації 0,01 с (для порівняння – період дискретизації пристроїв Регіна-Ч становить 0,02 с) в програмне середовище Matlab тривалістю 10,14 с, що забезпечує можливість ідентифікації частотних складових частин з кроком 0,09 Гц. Результати розрахунку по кожній з ЛЕП зведено до табл. 2.

Порівняння відповідних значень у наведених таблицях свідчить, що ідентифікація домінуючих частот НЧК на основі спектрального аналізу синхронізованих вимірів із розрахунком параметрів виявлених коливань для розглянутої схеми дає можливість виявити одну домінуючу частотну складову частину 1,56 Гц, яка присутня в перетоках активної потужності, що збігається з розрахунками модального аналізу програмою Power Factory.

В [1] зазначено, що залежно від місця прикладання збурення вільний перехідний процес буде мати різний характер, до того ж характер

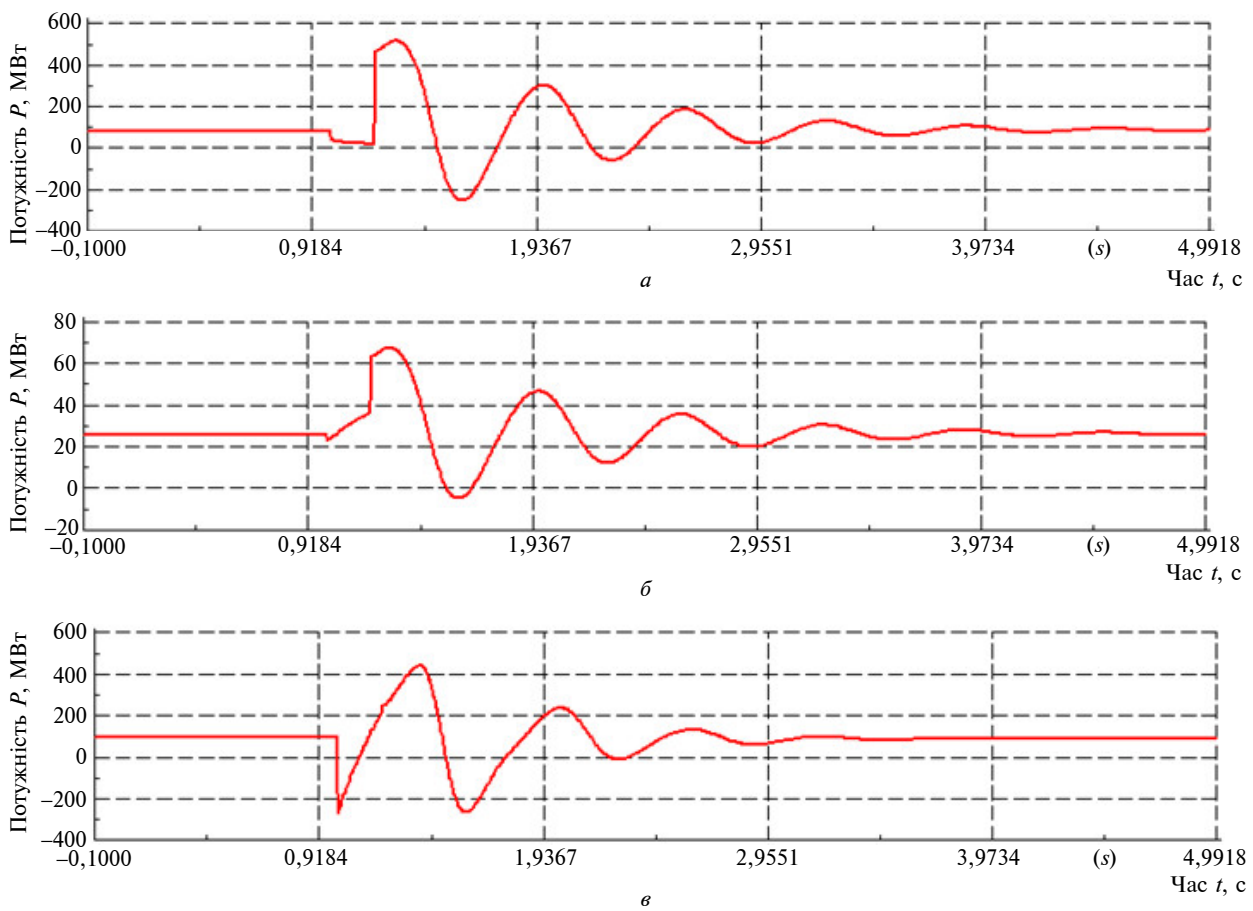


Рис. 3. Зміна перетоків активної потужності по ЛЕП при 3-ф. к.з. на ЛЕП-1

Таблиця 1. Результати модального аналізу тестової схеми

Мода	Дійсна частина, 1/с	Уявна частина, рад/с	Величина, 1/с	Кут, град	Частота, Гц	Період, с	Коефіцієнт затухання, 1/с	Коефіцієнт демпфування	Час затухання, с	Декремент затухання, A_1/A_2
0006	-1,81	10,93	11,08	99,39	1,74	0,58	1,81	0,16	0,55	2,83
0008	-1,23	9,86	9,93	97,1	1,56	0,64	1,23	0,12	0,81	2,18

Таблиця 2. Основні характеристики ідентифікованих домінуючих НЧК перетоків активної потужності тестової схеми

Лінія	Частота, Гц	Період, с	Початкова амплітуда, МВт	Декремент затухання, A_1/A_2	Логарифмічний декремент затухання	Коефіцієнт затухання, 1/с	Час затухання, с	Коефіцієнт демпфування	Власне число (дійсна і уявна частини)	Величина, 1/с	Кут, град
ЛЕП-1	1,56	0,64	390	2,12	0,75	1,17	0,85	0,12	$-1,17 + j 9,8$	9,87	96,8
ЛЕП-2	1,56	0,64	370	2,09	0,73	1,15	0,87	0,12	$-1,15 + j 9,8$	9,87	96,6
ЛЕП-3	1,56	0,64	33,2	2,78	1,02	1,59	0,63	0,16	$-1,59 + j 9,8$	9,93	99,1

перехідного процесу залежить від прояву тієї чи іншої частотної складової частини (за певних умов певні складники можуть повністю бути відсутніми в перехідному процесі). Частіше за все переважає в перехідному процесі і буде слабкозатухаючою мода коливання з найменшим коефіцієнтом затухання. Як видно з табл. 1, саме мода коливання з частотою 1,56 Гц має менший коефіцієнт затухання та ідентифікується як домінуюча в перетоках активної потужності по ЛЕП запропонованим алгоритмом.

Крім того, особливість НЧК перетоків активної потужності по ЛЕП полягає в тому, що найбільші амплітудні значення коливань спостерігаються на ЛЕП, які з'єднують генератори, що коливаються, і систему [7]. Дані табл. 2 підтверджують цю характеристику НЧК, оскільки розрахована початкова амплітуда коливань по ЛЕП між генераторами та ШНП значно більша, ніж амплітуда по ЛЕП між генераторами.

Таким чином, коливальні властивості виявлених НЧК перетоків активної потужності, отримані обробкою синхронізованих вимірів з пристроїв СМНР, відповідають розрахованим модальним аналізом власним числам ЕЕС, що підтверджує ефективність застосування представленого алгоритму ідентифікації НЧК.

Існуючий підхід до аналізу коливальної стійкості [8] не може повною мірою врахувати весь спектр схемно-режимних ситуацій через неповноту моделей, еквівалентування розрахункових схем заміщення, відсутність у деяких випадках врахування властивостей ЕЕС та наявних регуляторів, які мають вплив на коливальну стійкість. Ідентифікація НЧК на основі точних синхронізованих вимірів, на відміну від заздалегідь заданої моделі, містить у собі властивості реальної системи, що дає змогу аналізувати поточну ситуацію, а не найгірший випадок, як це робиться в традиційних підходах. У зв'язку з цим представлені дослідження НЧК перетоків активної потужності по синхронізованих векторних вимірах перехідних процесів можуть слугувати додатковим методом верифікації динамічних моделей.

Експериментальні дослідження НЧК перетоків активної потужності при виникненні значних збурень в ОЕС України

Унаслідок обробки синхронізованих даних реєстраторів Регіна-Ч верифікованим алгорит-

мом ідентифікації для аварійних подій в ОЕС України протягом тривалого часу визначено, що значні збурення в системоутворювальній мережі ОЕС України викликають появу електромеханічних низькочастотних коливань з частотами в діапазоні 0,1–1 Гц міжсистемного характеру у внутрішніх та міждержавних перетинах ОЕС. Аналіз отриманих характеристик НЧК потужності та їх демпферних властивостей засвідчив залежність величини початкової амплітуди від усталеного доаварійного значення перетоку активної потужності, тобто від початкових умов доаварійного режиму, величини збурення, зміни перетоку активної потужності внаслідок аварії та віддаленості від місця виникнення збурення [9].

Показовим прикладом зміни характеристик НЧК потужності залежно від величини збурень і рухом власних чисел по комплексній площині в бік погіршення демпферних властивостей є каскадна аварія на Вуглегірській ТЕС, що сталася 29.03.13 р. та супроводжувалась почерговим вимкненням трьох блоків по 300 МВт: першого блоку № 2 о 15:17:45, через 12 хв – другого блоку № 3 о 15:29:32, після чого через 2 хв – третього блоку № 4 о 15:31:10. Оперативно зібрані синхронізовані виміри пристроїв СМНР з 15-ти енергетичних об'єктів забезпечили вихідною інформацією для виконання ідентифікації НЧК по 11-ти ЛЕП 750 кВ, трьох ЛЕП 500 кВ та 22-х ЛЕП 330 кВ, які, відповідно, входять до різних внутрішніх перетинів ОЕС України та міждержавного перетину Україна–Росія, Білорусь. Визначено, що характер виявлених НЧК залежить від проміжку часу між збуреннями та роботою системи автоматичного регулювання частоти та потужності (САРЧП) по відновленню балансу активної потужності в ЕС. Так, вимкнення першого та другого блоків по 300 МВт супроводжувались появою неявно виражених коливань, оскільки на момент вимкнення другого блоку 300 МВт баланс у системі вже було відновлено САРЧП. Однак вимкнення третього блоку 300 МВт викликало більш значні коливання, тому що на момент його відключення небаланс активної потужності ще не в повному обсязі був покритий САРЧП. Розподіл власних чисел домінуючих мод коливання на комплексній площині при почерговому вимкненні трьох блоків по 300 МВт на Вуглегірській ТЕС наведено на рис. 4.

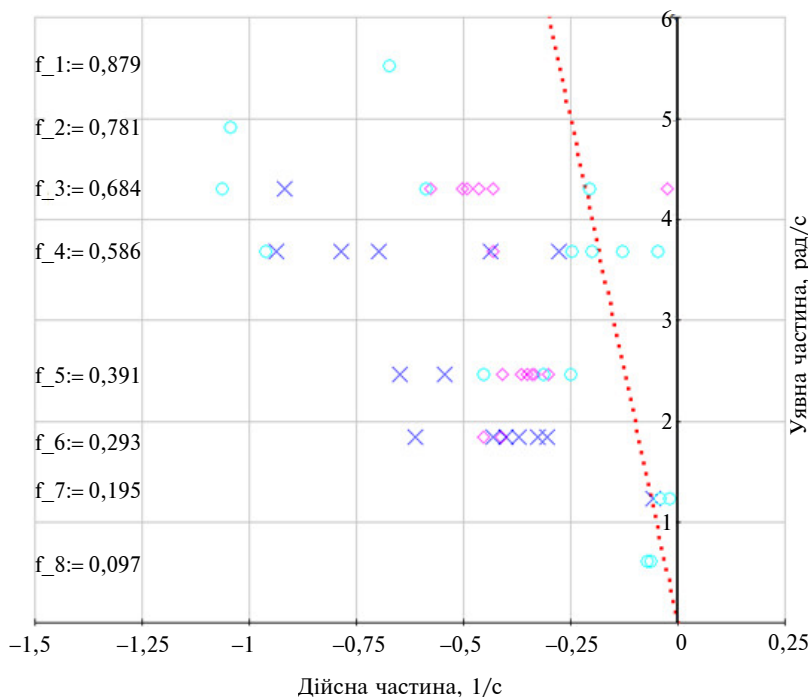


Рис. 4. Розподіл власних чисел домінуючих мод коливання на комплексній площині при почерговому вимкненні трьох блоків по 300 МВт на Вуглегірській ТЕС: X — першого; ◇ — другого; ○ — третього

У площині комплексних чисел наочно відображається рівень небезпеки ідентифікованих коливань з точки зору демпфування коливань. Похилою пунктирною лінією обмежено зону небезпечних режимів (праворуч від пунктиру коефіцієнт демпфування, менший ніж 5 %). У зарубіжних джерелах [10] критичним значенням коефіцієнта демпфування є величина 2–3 %, при якій відповідні коливання вважаються небезпечними в аспекті порушення коливальної стійкості. На рис. 4 спостерігається тенденція руху власних чисел в зону небезпечних режимів з точки зору демпфування коливань при наростанні величини збурення в мережі. Детальну інформацію по характеристиках ідентифікованих НЧК перетоків активної потужності по міждержавних та внутрішніх ЛЕП при почерговому вимкненні трьох блоків по 300 МВт на Вуглегірській ТЕС подано в [9].

Висновки

Розроблений алгоритм ідентифікації НЧК на основі синхронізованих векторних вимірів та розрахунків основних характеристик виявлених коливань дають можливість визначити домінуючі частотні складники, які присутні в

перетоках активної потужності (необхідно зазначити, що алгоритм можна застосовувати і до інших режимних параметрів) і швидко оцінити небезпеку поточних режимів роботи ЕЕС з точки зору недостатнього демпфування виявлених коливань та можливого порушення коливальної стійкості ЕЕС. Достовірність й адекватність запропонованого алгоритму перевірено зіставленням результатів зазначених вище розрахунків з традиційним розрахунком коливальних властивостей ЕЕС методом модального аналізу. Крім того, представлені дослідження НЧК перетоків активної потужності по синхронізованих векторних вимірах перехідних процесів можуть слугувати додатковим методом верифікації динамічних моделей, яким притаманні певні недоліки.

Практичне застосування цього алгоритму й аналіз основних властивостей низькочастотних ко-

ливань перетоків активної потужності по міждержавних і внутрішніх ЛЕП при виникненні збурень різної величини в системоутворювальній мережі ОЕС України може забезпечити відповідні підрозділи ДП НЕК “Укренерго” необхідною інформацією про виникнення небезпечних коливальних порушень у системі при протіканні відповідних аварійних процесів, визначити слабкі зв’язки в енергосистемі, розробити рекомендації зі встановлення необхідних сучасних пристроїв демпфування низькочастотних коливань.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі пов’язані з вдосконаленням та розвитком СМПП в ОЕС України, а саме реалізацією моніторингу енергосистем у режимі реального часу (розрахунок характеристик домінуючих коливань у режимі онлайн), що, в свою чергу, вимагає попереднього визначення оптимальних вимог до систем передачі інформації для пристроїв СМПП та їх здійснення. Важливим завданням залишається забезпечення ефективного демпфування коливань потужності, що є однією з обов’язкових вимог асоціації ENTSO-E щодо можливості реалізації паралельної роботи ОЕС України з енергетичним об’єднанням європейських країн.

Список літератури

1. *R. Graham*, Power System Oscillations. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2000, 328 p.
2. *D. Wilson and K. Hay*, Identifying sources of damping issues in the Icelandic power system, 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14–18, 2008, 8 p.
3. *Брехт О.О.* Перспективные направления развития магистральных электросетей // Электр. сети & системы. – 2013. – № 1. – С. 8–11.
4. *Буткевич О.Ф., Чижевський В.В.* Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб'єднань // Праці Ін-ту електродинам. НАН України: зб. наук. праць. Спец. вип. – 2010. – С. 72–77.
5. *Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 548 с.
6. *Сорокин Д.В.* Применение модального анализа для определения причины возникновения низкочастотных колебаний в энергосистемах // Сб. статей все-рос. науч.-техн. конф.: “Электроэнергетика глазами молодежи”. – Т. 1. – Екатеринбург, УрФУ, 2010. – С. 264–268.
7. *Бердин А.С., Герасимов А.С., Захаров Ю.П. и др.*, Методы исследования нелинейных и нестационарных свойств низкочастотных колебаний в энергосистеме // Сб. докл. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. “Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем” [Электронный ресурс]: изд. на CD-диске. – Екатеринбург, CIGRE, 2013. – С. 2–5.
8. *Стійкість енергосистем.* Керівні вказівки. – СОУ-Н МЕН 40.1-00100227-68:2012.
9. *Дослідження впливу низькочастотних коливань перетоків на режим роботи ОЕС України при регулюванні частоти та активної потужності. Етап II.* Оцінка впливу низькочастотних коливань на регулювання сальдо перетоків потужності у міждержавних та внутрішніх перетинах: Звіт про НДР. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 150 с.
10. *D. Wilson et al.*, “Classification of mode damping and amplitude in power system using synchrophasor measurements and classification trees”, IEEE Transactions on power systems, vol. 28, no. 2, 9 p., May 2013.

Рекомендована Радою
факультету електроенерготехніки та
автоматики НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
16 травня 2014 року